干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合分析

王　睿[1]，　杨国靖[2]
（1　西华师范大学国土资源学院，四川 南充 637009；2　中国科学院西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000）

摘　要：以典型生态脆弱区—库布齐沙漠为研究区，基于耦合度模型与耦合协调度模型，对2008—2017年库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合状况进行动态定量分析。结果表明：(1)2008—2017年，库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合发展呈现出较高水平的平稳态势，耦合度大多维持在0.819 8～1之间，且表现为先下降、后上升交替变化态势。(2)2008—2010年，库布齐沙漠生态治理的生态系统参数贡献度小于其社会经济系统参数贡献度，而2011—2017年则正好相反，且两个系统的参数贡献度时序变化呈逐年递增趋势。(3)2008—2017年，库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合协调度逐年增长，其耦合模式经历了从失调衰退类、过度发展类到协调发展类的变化，且不同年份耦合模式类型差异显著。(4)2008—2012年，系统耦合度处于高位状态，但耦合协调度却不处于高位。2013—2017年系统耦合度与耦合协调度变化趋势基本一致。未来库布齐沙漠化地区应以推进生态经济化、经济生态化为关键突破点，实现区域生态经济可持续发展。

关 键 词： 沙漠化治理；耦合度；耦合协调度；生态经济系统；库布齐沙漠

文章编号：

沙漠化是全球面临的重大生态环境问题之一，沙漠化的加剧严重威胁着人类的生存和社会经济发展[1]。近年来，沙漠化治理逐渐引起了学术界和政界的高度关注[2-4]。沙漠化治理是一项涉及区域生态系统与社会经济系统的综合工程[5-6]，自21世纪以来，我国先后实施了一系列以退耕还林还草、草原禁牧、天然林防护等为核心的沙漠化治理工程，极大地推动了区域生态环境改善和社会经济发展[7]。鉴于沙漠化治理涉及生态、社会、经济、技术等多方面，因此，正确协调沙漠化防治的各方面利益关系十分关键。本研究以典型生态脆弱区—库布齐沙漠为研究区，采用耦合度模型及耦合协调度模型，分析库布齐沙漠生态治理的生态经济系统的耦合状况，为库布齐沙漠化地区生态环境的改善与社会经济的可持续发展提供强有力的支撑。

系统耦合是指2个或2个以上的系统相互作用且彼此亲合的现象，当外界条件成熟时，系统间通过相互作用结合成为高一级的功能结构体[8]。近年来，关于系统耦合的研究大多围绕耦合协调测度方面展开。朱海娟等[9]通过构建生态与社会经济综合评价指标体系，分析了宁夏荒漠化治理生态经济系统的耦合态势，认为荒漠化治理工程的实施有利于宁夏生态经济系统良性耦合态势的形成。王继军等[10]以陕西省纸坊沟流域农业生态经济系统为研究对象，建立了农业生态经济耦合度模型，探究研究区近70 a来农业生态经济系统的耦合状况。原琳娜[11]以甘肃省玛曲县为研究区，采用耦合协调度模型，分析研究区生态、经济和社会系统耦合协调度，结果表明系统耦合状况呈现倒“U”型态势。刘秀丽等[12]以农户福祉角度为视角，构建了宁武县退耕还林生态经济系统评价模型，并对其退耕前后的耦合协调度进行科学分析。王介勇等[13]通过构建区域生态经济系统耦合过程模型，对黄河三角洲区域生态经济系统耦合过程与演进趋势进行

收稿日期： 2019-12-06；　**修订日期：** 2020-04-10
资助项目： 国家重点研发计划项目（2016YFC0500909）；西华师范大学科研启动基金项目（17E039）；四川省社会科学重点研究基地—四川循环经济研究中心2019年度项目（XXJJ-1910）资助
作者简介： 王睿（1986-），男，讲师，博士，研究方向为生态经济与区域可持续发展. E-mail: wangruiwr2009@126.com
通讯作者： 杨国靖，E-mail: ygj7518@163.com

科学分析，结果表明黄河三角洲生态系统与经济系统呈现互动协调发展趋势。通过梳理文献发现，目前关于生态经济系统耦合研究主要从生态经济系统的某个侧面进行分析，在多系统之间的综合研究略显欠缺，并且现有文献中关于沙漠化治理的生态经济系统耦合研究相对不足。因此，本研究基于生态经济学理论，构建库布齐沙漠生态治理评价指标体系，采用耦合度模型及耦合协调度模型，对2008—2017年库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合协调状况进行动态定量分析，以期为库布齐沙漠化地区生态修复和社会经济可持续发展提供科学支撑。

1 研究区概况

库布齐沙漠是中国第七大沙漠，地处107°18′～111°30′ E，39°30′～40°41′N之间，属于我国典型的生态脆弱区之一。库布齐沙漠全长约400 km，西部区南北较宽，约50 km，东部区南北较窄，沙丘高约10～60 m。库布齐沙漠年均蒸发量2 162 mm，昼夜温差大，年平均气温6.3 ℃，年大风天数为25～35 d，常年盛行西风、西北风[14]。

1988年以来，内蒙古自治区各级政府、企业和个人先后参与库布齐沙漠的生态治理[15]。目前库布齐沙漠化地区的生态环境得到极大改善，社会经济实现较快发展，人民生活水平逐步提高。回顾库布齐沙漠生态治理历程，大致分为5个阶段[16]：(1)被动造林期(1988—1995)，以资金短缺、技术落后、造林被动、治理面积小为特征。(2)主动造林期(1996—2001)，企业和个人积极参与沙漠化治理，政府推动力大，造林主动。(3)理想化造林期(2002—2003)，部分企业尝试生态治理，成效不明显。(4)正规化造林期(2004—2006)，政府重视、资金充足，治沙技术趋于成熟，治理成效较为显著。(5)科学化、规模化造林期(2007—)，治沙技术较为先进，造林面积较大，库布齐生态扶贫治沙模式形成，生态治理成效显著。目前，库布齐沙漠生态治理的生态系统趋于稳定，对外界环境的冲击具有较强的缓冲力，社会经济系统趋于平稳，系统耦合逐步趋向良性化发展，但区域内的耦合状况还未趋于最佳状态。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

耦合度模型与耦合协调度模型在系统耦合状况研究中已得到较广泛的应用。如刘新平等[17]采用耦合数理模型与耦合系统评价指标体系，计算了新疆干旱区生态与经济系统的耦合度。因此，本研究通过构建耦合度模型与耦合协调度模型来分析库布齐沙漠生态治理的生态经济系统的耦合状况。

2.1.1 耦合度模型 耦合度可用来评价系统间或各子系统间的耦合程度[18]。因该研究主要探讨生态系统与社会经济系统，故分别建立生态系统、社会经济系统综合评价函数$f(x)$和$g(y)$。其中，$f(x)$代表生态系统的参数贡献度，$g(y)$代表社会经济系统的参数贡献度，可分别用指标$x_1, x_2, \cdots, x_m$与$y_1, y_2, \cdots, y_n$来表示：

$$f(x) = \sum_{i=1}^{m} a_i x_i \tag{1}$$

$$g(y) = \sum_{j=1}^{n} b_j y_j \tag{2}$$

式中：m，n分别为生态系统、社会经济系统的指标数量，a_i，b_j分别为生态系统、社会经济系统各评价指标的权重，x_i，y_j分别为生态系统、社会经济系统各评价指标处理后的标准化值。根据公式(1)和公式(2)可得出沙漠化治理生态系统参数贡献度与社会经济系统参数贡献度，数值越大越好，反之亦然。

按照离差系数越小越协调的原则，可推导出沙漠化治理生态经济系统耦合度计算公式[19]：

$$C = \left\{ \frac{4f(x)g(y)}{\left[f(x)+g(y)\right]^2} \right\}^k \tag{3}$$

式中：k为调节系数，$k \in [2, 5]$。由于本研究主要探讨2个系统(生态系统、社会经济系统)的耦合度，同时借鉴汤青等学者研究成果，结合库布齐沙漠化地区的实际状况，故k值取2。C表示沙漠化治理生态系统与社会经济系统耦合度，且满足$C \in [0, 1]$，C值越大，表示两个系统耦合度高，且C越趋于1，证明两个系统间相互作用最大，反之亦然。

2.1.2 耦合协调度模型 耦合度模型在分析研究区沙漠化治理的生态经济系统耦合程度具有很好的指导意义。但是，耦合度模型也存在一定的适用局限性，主要表现在：首先，由于系统的交互复杂性，

其耦合度指标并不能有效表达生态系统和社会经济系统在沙漠化治理中的整体功能；其次，在多区域研究的情况下，单从耦合度模型去探究系统的耦合状况，难免会出现误导现象。基于此，以耦合度模型为前提，引入耦合协调度模型[20]，以期更客观反映系统间的耦合状况。

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (4)$$

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) \quad (5)$$

式中：D为耦合协调度，$D \in [0, 1]$，D值越大，表示生态系统与社会经济系统协调程度越高，反之亦然；T为生态与经济综合协调指数，表示生态系统与社会经济系统对系统整体的贡献率；α、β为待定权数，结合沙漠化治理实际状况，参考前人研究相关成果，且沙漠化治理中生态系统与社会经济系统同等重要，故本研究$\alpha = \beta = 0.5$，则见公式6：

$$T = \frac{1}{2}[f(x) + g(y)] \quad (6)$$

2.1.3　*沙漠化治理生态经济系统耦合协调度类型与评判标准*　经过30多年各方努力，库布齐沙漠生态环境得到有效改善，经济发展较快，库布齐沙漠化治理生态效益与经济效益较为明显，但库布齐沙漠生态系统仍较为脆弱，农户生活水平较低，极大制约着社会经济发展水平，对区域生态经济系统产生了较大影响。此外，农户生计水平也将对系统产生影响，如为谋生计导致过度放牧、高度开垦等现象的发生，不仅会造成生态环境恶化，而且成为沙漠化生态治理政策实施的限制因子。因此，在对库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合协调度类型划分时，既要考虑沙漠化地区生态环境状况，也要兼顾农户的生计水平。基于此，借鉴杜英和苏鑫等学者研究成果，结合库布齐沙漠生态经济现状，将耦合协调水平划分为3大类，再根据其生态系统参数贡献度和社会经济系统参数贡献度的相对关系，将其耦合协调度划分为10个小类[21]（表1）。

表1　耦合协调度类型及标准

Tab. 1　Coupling coordination types and standard

耦合协调度	水平分类	耦合协调类型	$g(y)/f(x)$及耦合模式
$0.0 \leq D < 0.1$	失调衰退类	极度失调衰退类	$g(y)/f(x) < 0.8$　经济损益型
$0.11 < D < 0.2$		严重失调衰退类	$0.8 \leq g(y)/f(x) \leq 1.2$　生态和经济共损型
$0.21 < D < 0.3$		中度失调衰退类	$g(y)/f(x) > 1.2$　生态损益型
$0.31 < D < 0.4$		轻度失调衰退类	
$0.41 < D < 0.5$	过度发展类	濒临失调衰退类	
$0.51 < D < 0.6$		勉强协调发展类	$g(y)/f(x) < 0.8$　经济滞后型
$0.61 < D < 0.7$	协调发展类	初级协调发展类	$0.8 \leq g(y)/f(x) \leq 1.2$　生态和经济同步型
$0.71 < D < 0.8$		中级协调发展类	$g(y)/f(x) > 1.2$　生态滞后型
$0.81 < D < 0.9$		良好协调发展类	
$0.91 < D \leq 1.0$		优质协调发展类	

2.2　数据来源

本研究数据来源于2008—2017年《内蒙古统计年鉴》、《鄂尔多斯统计年鉴》、《杭锦旗统计年鉴》和亿利资源集团提供的相关统计报表等资料。其中，生态系统评价指标数据通过对内蒙古国土资源公报、生态环境公报、遥感影像解译等综合分析获取，经济系统评价指标数据主要来源于统计年鉴、问卷调查及深度访谈。课题组成员先后3次深入鄂尔多斯市林业局、扶贫办、人社局和统计局等部门实地调研，同相关单位负责人进行深度访谈获取经济系统评价指标数据，其中部分年份缺失数据采用均值差补法进行补充。另一部分数据来源于问卷调查，课题组成员分别于2015年9月和2017年5月，采用参与式农村评估法对库布齐沙漠腹地的杭锦旗不同区域农户的治沙成效感知与生计状况进行调查，调查以户为单位，按照分层随机抽样的方式进行，先后发放调查问卷200份，有效问卷191份，回收率达95.5%。调查问卷内容包括农户对沙漠化治理意愿、对治沙认同度、治理成效感知、农户基本生计状况、经济收入等，并将所收集的数据进行处理与分析。

3　库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合分析

3.1　评价指标体系构建

影响沙漠化治理生态经济系统的因子众多，应

根据库布齐沙漠生态治理的实际状况，选择代表性强且便于量化的评价指标。因此，评价指标的选取应遵循全面性原则、可操作性原则、科学性原则、系统性与独立性相结合原则、整体性原则、定性与定量相结合原则等，分别运用实地考察、专家访谈及频度统计法来确定库布齐沙漠生态治理的评价指标体系，指标体系涵盖库布齐沙漠生态治理的生态系统与社会经济系统。

关于库布齐沙漠生态治理评价指标的遴选与构建，首先，借鉴前人相关研究成果，运用频度统计法对沙漠化治理评价常用的指标进行频度分析，遴选使用频率最高的40个指标作为沙漠化治理评价指标集；其次，深入库布齐沙漠化地区进行实地调研，收集相关资料，并邀请中国科学院西北生态环境资源研究院、西北师范大学、兰州大学、西华师范大学、鄂尔多斯市自然资源局、林业和草原局长期从事沙漠化防治和区域可持续发展研究领域的10位专家，通过设计调查表的形式对各项指标进行重要性打分，取其平均值，作为最终评价指标选取的重要依据，同时考虑数据的可获取性，从而构建评价指标体系（图1）。再次，利用层次分析法与专家咨询法确定评价指标权重。

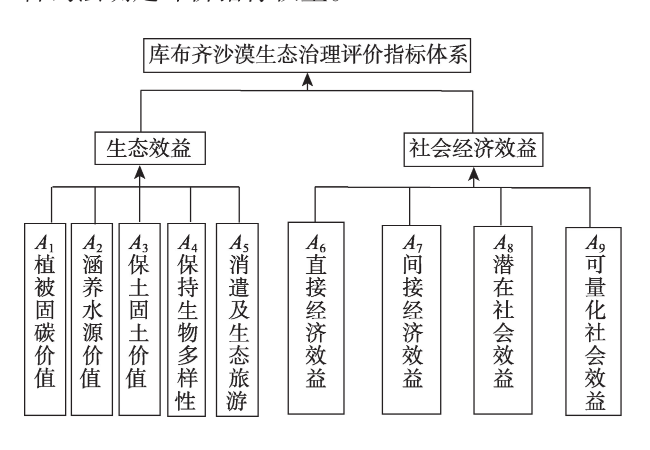


图1　库布齐沙漠生态治理评价指标体系

Fig. 1　Assessment index system of ecological control in Hobq Desert

图1中各指标的含义如下：

A_1：固碳价值B_1（10^8元·a^{-1}）、释氧价值B_2（10^8元·a^{-1}）；A_2：净化水质价值B_3（10^8元·a^{-1}）；A_3：林草固土价值B_4（10^8元·a^{-1}）、林草保肥价值B_5（10^8元·a^{-1}）；A_4：保持生物多样性价值B_6（10^8元·a^{-1}）；A_5：消遣及生态旅游B_7（10^8元·a^{-1}）；A_6：人均林业产值B_8（元）、年人均纯收入B_9（元）、人均牧业产值B_{10}（元）、人均农业产值B_{11}（元）；A_7：低保人口比重B_{12}（%）、农村剩余劳动力转移率B_{13}（%）；A_8：群众对治沙工作的认同率B_{14}（%）、群众对现有生活的满意度B_{15}（%）；A_9：恩格尔系数B_{16}（%）、儿童入学率B_{17}（%）、人均居住面积B_{18}（m^2·人$^{-1}$）。

3.2　数据的标准化处理

根据构建的沙漠化治理评价指标体系，收集2008—2017年《内蒙古统计年鉴》、《鄂尔多斯统计年鉴》及其《杭锦旗统计年鉴》等，结合实地调研，从而获取上述评价指标的原始数据（表2）。

由于各个评价指标所代表的含义不同，存在着量纲上的差异，而差异会对评价结果产生影响，故应对评价指标进行无量纲化处理，以得到消除量纲影响的结果值。计算公式如下所示：

$$U=\frac{x_{ij}-x_{ij\min}}{x_{ij\max}-x_{ij\min}} \tag{7}$$

$$U=\frac{x_{ij\max}-x_{ij}}{x_{ij\max}-x_{ij\min}} \tag{8}$$

式中：U为标准化后的值，x_{ij}为指标原始数据值，$x_{ij\max}$与$x_{ij\min}$分别代表指标原始数据中的最大值和最小值，其中，当目标值越大越好时，选用式7，反之用式8。利用上述公式将计算后的标准值见表3。

3.3　评价指标权重确定

本研究采用层次分析法与专家咨询法确定评价指标的权重。首先，根据层次分析法的原理，邀请中国科学院西北生态环境资源研究院、兰州大学、西北师范大学、西华师范大学、鄂尔多斯市自然资源局、林业和草原局长期从事沙漠化防治和区域可持续发展研究领域的10位专家学者，对各级评价中各个指标的相对重要性进行两两比较并打分，打分标准采用1～9和倒数的相对重要性标度，为了避免专家分析的主观性偏差，对偏差信息进行剔除，从而得到群体判断矩阵。其次，进行层次单排序、层次总排序及一致性检验，并借助Yaahp分析软件得出各评价指标的权重，结果见表4。

3.4　系统耦合结果分析

根据公式（1）～（8）和表3、表4，可逐步计算出2008—2017年库布齐沙漠生态治理的生态系统参数贡献度$f(x)$、社会经济系统参数贡献度$g(y)$、系统耦合度C及耦合协调度D。

3.4.1　社会经济与生态环境耦合时序变化　从图2可知，库布齐沙漠生态治理的生态经济耦合度大多

表2　评价指标原始数值

Tab. 2　Original data of the assessment indexes

指标	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
B_1	1.11	1.14	1.24	0.76	1.71	1.93	1.98	2.05	2.09	2.14
B_2	0.28	0.35	0.42	0.49	0.83	0.95	1.13	1.12	1.21	1.25
B_3	0.44	0.46	0.5	0.6	0.69	0.7	0.73	0.75	0.78	0.81
B_4	19.98	24.96	30.37	36.89	44.39	50.25	54.73	58.57	63.24	69.16
B_5	23.31	23.41	24.85	24.91	26.03	26.93	27.02	27.88	29.67	33.23
B_6	11.21	11.41	12.03	12.06	12.87	13.32	13.43	14.55	14.69	15.42
B_7	50.80	59.30	76.10	95.00	125.40	152.40	197.10	255.90	313.90	378.30
B_8	288.30	367.10	336.60	442.50	397.50	696.80	635.00	697.20	708.50	775.40
B_9	10 467	13 067	15 362	18 259	21 042	22 879	22 412	23 987	25 749	27 876
B_{10}	3 613	4 527	4 821	3 121	3 615	4 100	4 508	4 736	4 981	5 320
B_{11}	5 216	6 102	7 477	5 868	6 600	7 019	7 384	7 651	7 325	7 946
B_{12}	20.00	20.50	19.40	19.20	18.70	17.40	16.50	16.10	15.30	12.40
B_{13}	3.20	4.50	4.90	5.10	6.60	8.30	9.20	9.70	10.20	11.40
B_{14}	82.10	85.30	85.90	86.80	87.50	91.20	91.70	92.40	93.50	95.10
B_{15}	51.30	52.60	54.70	53.00	55.40	56.50	57.30	58.50	59.00	61.70
B_{16}	32.00	27.10	27.50	29.70	27.60	26.70	25.70	24.30	23.00	21.80
B_{17}	89.10	90.60	92.70	94.50	96.90	98.30	98.40	98.80	99.00	99.60
B_{18}	23.20	24.40	24.70	25.30	25.70	26.40	27.30	27.80	28.30	31.70

表3　评价指标标准化值

Tab. 3　Normalized values of the assessment indexes

指标	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
B_1	0.253 6	0.275 4	0.347 8	0.000 0	0.688 4	0.847 8	0.884 1	0.934 8	0.963 8	1.000 0
B_2	0.000 0	0.072 2	0.144 3	0.216 5	0.567 0	0.690 7	0.876 3	0.865 9	0.958 8	1.000 0
B_3	0.000 0	0.054 1	0.162 2	0.432 4	0.675 7	0.702 7	0.783 8	0.837 8	0.918 9	1.000 0
B_4	0.000 0	0.101 3	0.211 3	0.343 8	0.496 3	0.615 5	0.706 6	0.784 7	0.879 6	1.000 0
B_5	0.000 0	0.010 1	0.155 2	0.161 3	0.274 2	0.364 9	0.373 9	0.460 7	0.641 1	1.000 0
B_6	0.000 0	0.047 5	0.194 8	0.201 9	0.394 3	0.501 2	0.527 3	0.793 3	0.826 6	1.000 0
B_7	0.000 0	0.025 6	0.077 3	0.134 9	0.227 8	0.310 2	0.446 7	0.626 3	0.803 4	1.000 0
B_8	0.000 0	0.161 8	0.099 2	0.316 6	0.224 2	0.838 6	0.711 8	0.839 5	0.862 7	1.000 0
B_9	0.000 0	0.149 3	0.281 2	0.447 6	0.607 4	0.713 0	0.686 1	0.776 6	0.877 8	1.000 0
B_{10}	0.223 7	0.639 4	0.773 1	0.000 0	0.224 6	0.445 2	0.630 7	0.734 4	0.845 8	1.000 0
B_{11}	0.000 0	0.324 5	0.828 2	0.238 8	0.507 0	0.660 4	0.794 1	0.891 9	0.772 5	1.000 0
B_{12}	0.061 7	0.000 0	0.135 8	0.160 5	0.222 2	0.382 7	0.493 8	0.543 2	0.642 0	1.000 0
B_{13}	0.000 0	0.158 5	0.207 3	0.231 7	0.414 6	0.621 9	0.731 7	0.792 7	0.853 7	1.000 0
B_{14}	0.000 0	0.246 2	0.292 3	0.361 5	0.415 4	0.700 0	0.738 5	0.792 3	0.876 9	1.000 0
B_{15}	0.000 0	0.125 0	0.326 9	0.163 5	0.394 2	0.500 0	0.576 9	0.692 3	0.740 4	1.000 0
B_{16}	0.000 0	0.480 4	0.441 2	0.225 5	0.431 4	0.519 6	0.617 6	0.754 9	0.882 4	1.000 0
B_{17}	0.000 0	0.142 9	0.342 9	0.514 3	0.742 9	0.876 2	0.885 7	0.923 8	0.942 9	1.000 0
B_{18}	0.000 0	0.141 2	0.176 5	0.247 1	0.294 1	0.376 5	0.482 4	0.541 2	0.600 0	1.000 0

维持在0.819 8～1之间，表明其生态系统与社会经济系统耦合度较高，两个系统间相互作用较大，系统逐步趋于稳定健康状态，且库布齐沙漠化地区的经济发展对沙漠化生态治理具有较强的正向促进作用，能有效遏制沙漠化蔓延。从系统耦合度时序来看，2008—2017年库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合度呈现先下降、后上升交替变化趋势。其中，2009—2010年，耦合度略为下降，且2009年耦

表4 评价指标权重值

Tab. 4 Weight of assessment index

总目标	系统层	标准层		指标层		综合权重
		指标	权重	指标	权重	
库布齐沙漠生态治理评价指标体系	生态效益	A_1	0.151 1	B_1	0.751 0	0.113 5
				B_2	0.249 0	0.037 6
		A_2	0.316 1	B_3	1.000 0	0.316 1
		A_3	0.163 9	B_4	0.673 0	0.110 3
				B_5	0.327 0	0.053 6
		A_4	0.302 3	B_6	1.000 0	0.302 3
		A_5	0.066 7	B_7	1.000 0	0.066 7
	社会经济效益	A_6	0.245 2	B_8	0.146 8	0.036 0
				B_9	0.302 4	0.074 1
				B_{10}	0.459 6	0.112 7
				B_{11}	0.091 1	0.022 3
		A_7	0.093 1	B_{12}	0.252 0	0.023 5
				B_{13}	0.748 0	0.069 6
		A_8	0.505 0	B_{14}	0.250 0	0.126 3
				B_{15}	0.750 0	0.378 8
		A_9	0.156 7	B_{16}	0.238 5	0.037 4
				B_{17}	0.625 0	0.097 9
				B_{18}	0.136 5	0.021 4

合度出现最低值0.602 0，2011年耦合度有所上升，为0.996 9，2012年耦合度略为下降，此后2013—2014年又逐步上升，表明此阶段正在向系统磨合期过渡，这与科学防治沙漠化及区域生态环境改善有极大关系。2015—2016年耦合度波动下降，这与库布齐地区水资源短缺密切相关，由于近年来库布齐地区生态用水量增加，加之该时期干旱导致水资源短缺，这在一定程度上加剧了生态系统脆弱度，最终使两个系统的耦合度下降，2017年耦合度达到峰值1.000 0。

结合2008—2017年库布齐沙漠生态治理的生态系统、社会经济系统之间的参数贡献度来看(图2)，2008—2010年生态系统参数贡献度小于社会经济系统参数贡献度，2011—2016年则呈现反向趋势，表现为社会经济系统参数贡献度小于生态系统参数贡献度，这是因为2008—2010年研究区社会经济结构合理，沙漠化治理的社会经济效益显著，而生态效益的显现具有滞后性，是一个长期的、渐变的过程，故生态系统参数贡献度小于社会经济系统参数贡献度。而2011—2016年社会经济系统参数贡献度小于生态系统参数贡献度，这与此阶段社会经济发展的内在结构协调度低有关，不合理的社会经济结构已成为阻碍库布齐沙漠生态治理的生态

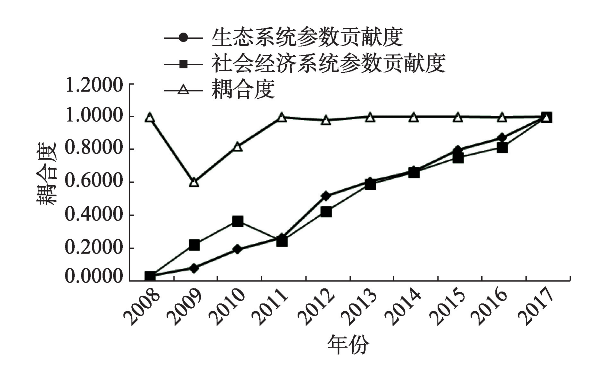


图2 2008—2017年库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合度时序变化

Fig. 2 Variation of coupling degree between ecology and economic system of ecological control in Hobq from 2008 to 2017

经济系统协调持续发展的制约因素，这也表明库布齐沙漠化地区脆弱的生态环境是区域社会经济发展的主要瓶颈。从两个系统的参数贡献度时序变化可知(图2)，除2011年社会经济系统参数贡献度波动下降外，总体上呈现出逐年递增趋势，表明库布齐沙漠生态治理的各系统内在结构正在趋向协调。其中，2008—2017年，库布齐沙漠化治理成效显著，10 a间生态系统参数贡献度增长了约330%，即从2008年的0.028 8增长到2017年的1.000 0，其社会经济系统参数贡献度也呈逐年增加态势，约增长364%，即从2008年的0.026 7增长到2017年的1.000 0。

3.4.2 生态经济系统耦合协调度分析 从图3分析可知，2008—2017年库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合协调度维持在0.166 2～1之间，且一直保持逐年增长趋势。2008—2011年库布齐沙漠生态治理的生态环境与社会经济之间的发展关系总

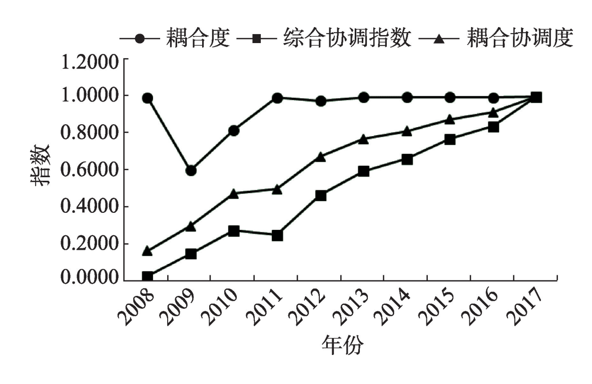


图3 库布齐沙漠生态治理的生态经济系统协调时序变化

Fig. 3 Variation of coordination degree between ecology and economic system of ecological control in Hobq from 2008 to 2017

体处于失调衰退类，但耦合协调度呈现增加趋势，即从2008年的0.166 2增加到2011年的0.500 7，增加约200%。其中，2008年研究区生态环境与社会经济之间的发展关系属于严重失调衰退，耦合协调度出现近10 a最低值0.166 2，且生态系统与社会经济系统为共损型耦合模式。2009年研究区生态环境与社会经济之间的发展关系属于轻度失调衰退，耦合协调度达0.300 2，生态系统与社会经济系统属于生态损益型耦合模式。2010—2011年研究区生态环境与社会经济之间的发展关系属于濒临失调衰退类，耦合协调度较之前略有上升，但生态系统与社会经济系统耦合模式则不同，分别是生态滞后型与生态经济同步型。2012—2017年研究区生态环境与社会经济之间的发展关系属于协调发展类，耦合协调度从2012年的0.677 5到2017年的1.000 0，增加了47.6%，生态系统与社会经济系统耦合模式逐渐由初级协调发展类生态经济同步型向优质协调发展类生态与经济同步型过渡，表明系统耦合协调状况正在由无序向有序的方向发展。总体来看，2008—2017年库布齐沙漠生态治理的生态系统与社会经济系统耦合协调度呈逐年增长趋势，系统综合协调指数变化趋势基本相同，耦合模式经历了从失调衰退类、过度发展类到协调发展类的变化过程，且各年份耦合模式类型差异显著。

通过2008—2017年库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合度与耦合协调度对比发现，除2009年外，其余年份系统耦合度均处于高位状态，但耦合协调度却不处于高位，特别是2008—2012年系统耦合协调度较低，这是由于此阶段研究区生态系统与社会经济系统间存在较多的物质流与能量流，彼此间相互作用较强，鉴于生态经济系统结构本身的复杂性，可能某一系统内的子系统发展阻碍了系统整体演化，从而诱发系统进行自我调节，这种调节作用结果并未促使系统整体向良性方向演变，最终导致生态系统与社会经济系统耦合协调度较低。2013—2017年库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合度与耦合协调度变化趋势基本一致，表明生态环境的改善对社会经济的发展起正向作用，可以通过两个系统之间的物质流、能量流及物质循环等，促使其生态系统与社会经济系统不断协调发展。

图2、图3分析表明，2008—2011年库布齐沙漠生态治理的生态系统与社会经济系统参数贡献度均较低，生态环境建设严重制约着区域社会经济发展，反过来社会经济发展也对生态系统的健康稳定产生较大影响，这是导致研究区生态系统与社会经济系统耦合协调度较低且处于失调衰退类的主要原因之一，今后应将改善生态环境与发展经济作为库布齐沙漠化地区可持续发展的重要方向。2012—2017年，随着国家大力实施精准扶贫战略及生态文明建设，库布齐沙漠化地区的生态环境改善明显，农户生活水平得到较大提高，从而生态系统与社会经济系统参数贡献度不断增加，且耦合协调度变化趋势基本一致。

4　讨　论

（1）2008—2017年，库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合协调类型经历了“失调衰退类、过度发展类、协调发展类”的变化。随着库布齐沙漠化治理力度的进一步加大，生态用水量相应增加，这将在一定程度上导致区域水资源短缺，且库布齐沙漠化地区生态系统的脆弱性，潜伏了系统耦合协调发展的危机，这一科学研判与该区域实际相符，进一步证明了分析“系统耦合度与耦合协调度”对探究沙漠化治理的生态经济系统耦合状况具有重要的指导意义。研究库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合状况，可为判定沙漠化治理的生态—经济—社会互动关系和预测沙漠化地区生态经济耦合发展趋势提供科学支撑。

（2）根据2008—2011年库布齐沙漠生态治理的生态系统参数贡献度、社会系统参数贡献度较低的情况分析可知，生态环境与区域社会经济发展之间存在相互制约、相互影响的关系，表现为生态环境建设影响区域社会经济发展，且社会经济发展也反作用于生态系统的健康稳定，这是导致研究区生态经济系统耦合协调度较低的主要原因之一。因此，需要调整库布齐沙漠化地区产业结构，优化产业升级，消除生态贫困，积极有效调控管理沙漠化问题，同时积极推进库布齐沙漠生态治理可持续发展模式，该模式以治理沙漠化和发展生态经济为核心，在库布齐沙漠化地区应用前景广泛，已在我国类似沙漠化地区（如甘肃武威、新疆和田等）推广应用，可实现沙漠化地区生态经济系统协调可持续发展。

（3）根据前人研究结果表明[22]，系统耦合度仅能反映系统耦合的发展趋势，很难反映系统耦合协

调的效果，这一点在该研究区也表现较为突出。表现为不同年份耦合度下的耦合协调效果差异较大。如2008年系统的耦合度高于2009年，但系统耦合协调度却低于2009年，其耦合协调效果明显不同。因此，耦合度指标应与其他相关指标相结合来表征沙漠化治理生态经济系统耦合状况。此外，关于库布齐沙漠治理生态经济系统耦合协调度的划分，借鉴了退耕还林工程及其他相关研究成果，随着研究区生态经济系统的变化，应对其耦合协调度划分标准进行科学调整，这是本研究今后努力的方向。

5 结 论

（1）2008—2017年库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合发展呈现出较高水平的平稳态势，且耦合度数值大多处于0.8 198～1之间。从耦合度时序看，2008—2017年耦合度呈现先下降、后上升交替变化趋势，生态系统与社会经济系统相互作用强度较大。宁夏荒漠化[9]、黄土高原退耕还林[12]、陕西纸房沟流域[10]等关于生态经济系统的耦合研究表明，耦合度时序状况呈现逐年增加态势，但本研究与以上区域研究分析相悖，库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合度变化呈先下降、后上升的发展趋势。

（2）2008—2010年库布齐沙漠生态治理的生态系统参数贡献度小于社会经济系统参数贡献度，2011—2017年则正好相反。对于两个系统的参数贡献度时序变化比较，除2011年社会经济系统参数贡献度波动下降外，总体上呈逐年递增态势。表明对库布齐沙漠生态治理的生态经济系统理想状态的调控而言，2008—2010年社会经济系统各项指标具有主导作用，而2011—2017年生态系统指标起主导作用。当研究区生态环境极大改善后，生态经济系统具有较强的反馈和互动作用，这与前人研究结果较为一致。

（3）2008—2017年库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合协调度维持在0.1 662～1之间，且呈逐年增长趋势，系统耦合协调状况正在由无序向有序的方向发展。耦合模式经历了从失调衰退类、过度发展类到协调发展类的变化，且不同年份的耦合模式类型差异显著。表明协调好研究区生态环境与社会经济的关系是促进系统耦合协调发展的关键，由于各年份耦合模式类型的不同，研究区生态环境与社会经济发展的耦合协调度有待进一步提高。

（4）通过2008—2017年库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合度与耦合协调度比较，除2009年系统耦合度较低外，其余年份系统耦合度均处于较高状态，但耦合协调度却不处于高位，特别是2008—2012年系统耦合协调度较低，表明此阶段研究区生态系统与社会经济系统互动作用强度较大，但这种作用并未能促进系统的整体协调发展。2013—2017年库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合度与耦合协调度变化趋势基本一致，这与王介勇等[13]关于黄河三角洲区域的生态经济系统的耦合研究结果较为一致。

参考文献(References)

[1] 王娅, 周立华. 宁夏盐池县沙漠化逆转过程的脆弱性诊断[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 39−47. [WANG Ya, ZHOU Lihua. Vulnerability of desertification reversion process in Yanchi County, Ningxia, China[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 39−47.]

[2] 杨发相, 李生宇, 岳健, 等. 新疆荒漠类型特征及其保护利用[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 14−21. [YANG Faxiang, LI Shengyu, YUE Jian, et al. Characteristics of desert types and their protection and utilization in Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 14−21.]

[3] 马俊, 牟雪松, 王永达, 等. 近1 ka以来河西地区的沙漠化及对高强度人类活动的响应分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 145−154. [MA Jun, MU Xuesong, WANG Yongda, et al. Response of desertification to intensified human activities over the latest 1 ka in Hexi region [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 145−154.]

[4] HAWLENA D, BOUSKIAL A. Land management practices for combating desertification cause species replacement of desert lizards [J]. Journal of Applied Ecology, 2006, 43(4): 701−709.

[5] 王涛. 荒漠化治理中生态系统、社会经济系统协调发展问题探析—以中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治为例[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7045−7048. [WANG Tao. Study on the coordinated development of ecosystem and socio-economic system in desertification control: A case study of desertification control in semiarid area in North China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7045−7048.]

[6] 阿如旱, 都来, 盛艳, 等. 基于Logistic回归模型的内蒙古多伦县土地沙漠化驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 139−145. [A Ruhan, DU Lai, SHENG Yan, et al. Driving forces on land desertification in Duolun County Inner Mongolia based on Logistic regress model [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 139−145.]

[7] 魏建洲, 刘彦平, 张锋, 等. 生态建设工程中利益主体间的博弈模型—以政府主导的退耕还林还草工程为例[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 836− 841. [WEI Jianzhou, LIU Yanping, ZHANG

Feng, et al. Game model of interest subject in ecological construction project: A case study of the government-lead turning cultivated land back into forests and grasslands project[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(3): 836-841.]

[8] 朱晓柯, 万志芳. 林业生态、产业和民生系统耦合协调的动态演进—以黑龙江省国有林区为例[J]. 统计与信息论坛, 2019, 34(2): 56-64. [ZHU Xiaoke, WAN Zhifang. The dynamic evolution of coupling and coordination of forestry ecology, industry and people′s livelihood system: Taking the state-owned forest area of Heilongjiang province as an example [J]. Forum on Statistics and Information, 2019, 34(2): 56-64.]

[9] 朱海娟, 姚顺波. 宁夏荒漠化治理生态经济系统耦合过程研究[J]. 科技管理研究, 2015, 24(6): 242-245. [ZHU Haijuan, YAO Shunbo. Study on coupling process of desertification control eco-economic system in Ningxia[J]. Science and Technology Management Research, 2015, 24(6): 242-245.]

[10] 王继军, 姜志德, 连坡, 等. 70年来陕西省纸坊沟流域农业生态经济系统耦合态势[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 5130-5137. [WANG Jijun, JIANG Zhide, LIAN Po, et al. Coupling analysis of the agricultural ecological economic system over 70 years in the Zhifanggou watershed, Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 5130-5137.]

[11] 原琳娜. 生态脆弱区生态经济系统耦合及模拟调控研究—以甘南高原玛曲县为例[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017. [YUAN Linna. Study on the coupling and simulated regulation of eco-economic systems in ecologically fragile areas: Taking Maqu County of Gannan Plateau as an example [D]. Xi′an: Shaanxi Normal University, 2017.]

[12] 刘秀丽, 张勃, 吴攀升, 等. 基于农户福祉的黄土高原土石山区退耕还林生态经济系统耦合效应—以宁武县为例[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 113-117. [LIU Xiuli, ZHANG Bo, WU Pansheng, et al. The coupling effect of converting farmland into forest ecological economy system based on the farmers well-being in the earth-rock mountains areas of Loess Plateau: A case study of Ningwu County [J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2016, 52(3): 113-117.]

[13] 王介勇, 吴建寨. 黄河三角洲区域生态经济系统动态耦合过程及趋势[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4861-4868. [WANG Jieyong, WU Jianzhai. Dynamic coupling process and trend of eco-economic system in Yellow River delta region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4861-4868.]

[14] 陈雅琳, 常学礼, 崔步礼, 等. 库布齐沙漠典型地区沙漠化动态分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 27-34. [CHEN Yalin, CHANG Xueli, CUI Buli, et al. Dynamic analysis of desertification in typical areas of the Hobq Desert[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(1): 27-34.]

[15] 郭彩赟, 韩致文, 李爱敏, 等. 库布齐沙漠生态治理与开发利用的典型模式[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 112-118. [GUO Caiyun, HAN Zhiwen, LI Aimin, et al. The typical model of ecological management and development and utilization in the Hobq Desert [J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2017, 53(1): 112 -118.]

[16] 王睿. 库布齐沙漠东缘防沙治沙生态效益评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 180-185. [WANG Rui. The evaluation of desertification control ecological benefits on the eastern edge of the Hobq Desert [J]. Bulletin of Water and Soil Conservation, 2018, 38(5): 180-185.]

[17] 刘新平, 孟梅. 新疆农业生态经济协调发展耦合关系分析[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(5): 1002-1008. [LIU Xinping, MENG Mei. Analysis on the coupling relationship of coordinated development of agriculture ecology economy in Xinjiang [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(5): 1002-1008.]

[18] 田俊峰, 王彬燕, 王士君. 东北三省城市土地利用效益评价及耦合协调关系研究[J]. 地理科学, 2019, 39(2): 135-145. [TIAN Junfeng, WANG Binyan, WANG Shijun. Study on urban land use benefit evaluation and coupling coordination in the three northeastern provinces [J]. Science Geography Sinica, 2019, 39(2): 135-145.]

[19] 杜英. 黄土丘陵区退耕还林生态系统耦合效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008. [DU Ying. Study on coupling effect of returning farmland to forest ecosystem in Loess hilly area [D]. YangLing: Northwest Agricultural and Forestry University, 2008.]

[20] 周彬, 张梦瑶, 钟林生, 等. 内蒙古旅游经济与文化产业耦合协调度测评[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(4): 205-210. [ZHOU Bin, ZHANG Mengyao, ZHONG Linsheng, et al. Evaluation of the coupling coordination of tourism economy and cultural industry in Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(4): 205-210.]

[21] 朱海娟, 姚顺波. 宁夏荒漠化治理生态经济系统耦合效应研究[J]. 统计与信息论坛, 2014, 29(11): 71-76. [ZHU Haijuan, YAO Shunbo. Study on coupling effect of desertification control eco-economic system in Ningxia [J]. Forum on Statistics and Information, 2014, 29(11): 71-76.]

[22] 毕安平. 水土流失区生态—经济系统耦合效应[D]. 福州: 福建师范大学, 2011. [BI Anping. Coupling effects of eco-economic system in soil erosion region [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2011.]

Coupling analysis of eco-economic system for ecological management in the Hobq Desert

WANG Rui[1], YANG Guo-jing[2]

(1 *College of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong* 637009, *Sichuan, China;*
2 *Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*)

Abstract: Improving the coupling and coordination of the ecological economic (eco-economic) system in areas experiencing desertification is the best way to address regional socioeconomic development and fragile ecological environments. Research on coupling in ecological economic systems of areas undergoing desertification is thus important for achieving consistency in ecological protection and economic development and for establishing an efficient and sustainable eco-economic system for desertification control. Knowledge about the degree of coupling coordination can help clarify interactions between ecological and social economic systems in such areas and be used to judge the coupling state of the eco-economic system. The Hobq Desert, a typical ecologically fragile area, was selected as a research area. Over the past 30 years, local governments and enterprises have been actively working to control desertification, which has greatly promoted the rapid development of the regional social economy. However, the ecological environment of the Hobq Desert is still fragile and socioeconomic development remains relatively slow. The relationship between the ecosystem and socioeconomic system remains an unanswered question. How to realize the coupling and coordinated development of the eco-economic system remains a key scientific problem that must be solved. This paper selects the eco-economic system of ecological control in the Hobq Desert as a research object. The study uses social questionnaire investigation statistics and statistical data as the main data sources, combined with environmental data and ground surveys of the study area. With these data, the paper constructs an evaluation index system based on actual conditions of the study area along with relevant research results. The coupling degree model and coupling coordination degree model were used to analyze the coupling and coordination state of the eco-economic system in the study area from 2008 to 2017 to provide scientific support for the ecological restoration and sustainable development of the regional social economy in the Hobq Desert. The results demonstrated the following. (1) The coupled development of the eco-economic system of ecological control in the Hobq Desert was relatively stable and at a high level from 2008 to 2017, with a coupling degree mostly between 0.8 198-1. The coupling degree showed a variation trend that first decreased and then increased alternately. (2) From 2008 to 2010, the contribution of the ecosystem parameters of ecological control in the Hobq Desert was less than that of socioeconomic system parameters. In contrast, the latter was bigger from 2011 to 2017 and the timing variation of the contribution of two system parameters increased yearly. (3) The degree of system coupling coordination increased yearly from 2008 to 2017. The coupling model experienced changes from the dysfunctional decline and change from over-development to coordinated development, and coupling model types in different years differed significantly from year to year. (4) The coupling and coupling coordination degrees are inconsistent from 2008 to 2012. The variation trend of coupling and coupling coordination degrees are similar from 2013 to 2017. On this basis, policy recommendations for the sustainable development of a regional ecological economy are proposed in the study area to promote ecological economicization and economic ecologicalization.

Key words: desertification control; coupling degree; coupling coordination degree; eco-economic system; Hobq desert